

Begrenzung von Kurzschlußströmen mit Hochtemperatur-Supraleitern

Neue Perspektiven für elektrische Energieversorgungsnetze

Lindmayer, Manfred

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1997 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.17-25



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

MANFRED LINDMAYER, Braunschweig

Begrenzung von Kurzschlußströmen mit Hochtemperatur-Supraleitern Neue Perspektiven für elektrische Energieversorgungsnetze

Braunschweig, 7. Februar 1997*

Einleitung

Seit der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL) vor einem Jahrzehnt finden weltweit intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit dieser neuen Werkstoffgruppe statt. Sie lassen sich unterteilen in

- Untersuchung der physikalischen Grundlagen
- Entwicklung von HTSL-Werkstoffen und Herstellverfahren
- Untersuchung und Entwicklung neuer Anwendungen mit HTSL

In der elektrischen Energietechnik ist die Verlustfreiheit der Supraleiter von besonderem Interesse. Im Gegensatz zu den bereits lange bekannten Tieftemperatur-Supraleitern, die zur Kühlung Flüssig-Helium benötigen, kommen Hochtemperatur-Supraleiter, deren kritische Temperaturen derzeit bei 90 bis 110 K liegen, mit Flüssig-Stickstoff (Siedepunkt 77 K) aus, der wesentlich niedrigere Kosten verursacht und gut handhabbar ist. Abhängig vom Anwendungsfall bieten HTSL zudem technische Vorteile, z.B. höhere Wärmekapazität. Man sieht deshalb die künftige Anwendung von Hochtemperatur-Supraleitern in der elektrischen Energietechnik als sehr chancenreich an und arbeitet konkret an der Entwicklung folgender Komponenten:

- Neuartige supraleitende Energiespeicherspulen („SMES“)
- Elektrische Maschinen
- Transformatoren
- Kabel
- Strombegrenzer

Strombegrenzendes Schalten

In den zahlreichen Knotenpunkten unserer Energieversorgungsnetze befinden sich sog. Leistungsschalter, die im nie vermeidbaren Kurzschlußfall, der z.B. durch Blitzeinschlag verursacht werden kann, den dabei fließenden hohen Kurzschlußstrom – er

* Kurzfassung eines auf der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehaltenen Vortrags

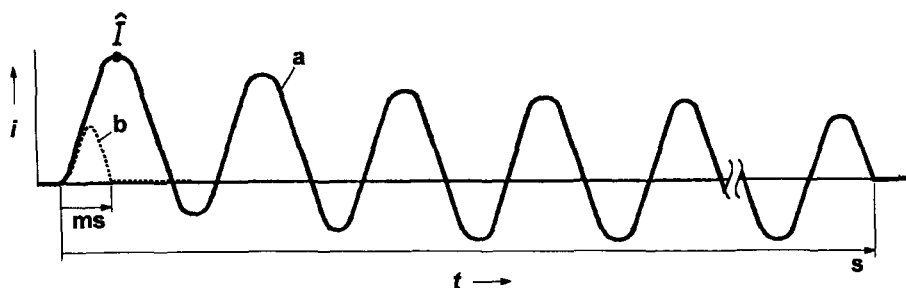


Bild 1:
Herkömmliche (a) und strombegrenzende Kurzschluß-Abschaltung (b)

beträgt bis zur Größenordnung 100 000 A – automatisch und sicher unterbricht. Einen typischen Stromverlauf einer solchen Abschaltung in einem Hochspannungsnetz zeigt Bild 1 (a). Die Zeit vom Beginn des Kurzschlusses bis zur Beendigung des Stromes liegt im Zehntelsekunden- bis Sekundenbereich. Alle Komponenten („Betriebsmittel“) des Netzes sind für diese Zeit den hohen auftretenden thermischen Beanspruchungen sowie den Stromkräften („dynamische Beanspruchungen“) ausgesetzt und müssen entsprechend dimensioniert sein. Die Kurve b in Bild 1 zeigt dagegen einen typischen Verlauf einer „strombegrenzenden“ Abschaltung, wie sie schon lange, z. B. bei Sicherungsautomaten auf der 230 V-Endverbraucher-Ebene, im sog. Niederspannungsnetz, verwirklicht wird. Strombegrenzendes Schalten auch in Hochspannungs-Netzen würde dort erhebliche Vorteile bieten:

- Verringerung der thermischen Beanspruchung $\propto \int i^2 dt$
- Verringerung der dynamischen Kräfte $\propto \hat{i}^2$
- Erhöhung der dynamischen Netzstabilität durch Verringerung der Kurzschlußdauer

Daß diese Vorteile des strombegrenzenden Schaltens – von wenigen Sonderfällen abgesehen – heute noch nicht genutzt werden, hat zwei Ursachen. Zum einen sind strombegrenzende Schaltgeräte technisch wesentlich aufwendiger und damit teurer. Zum anderen basiert die gesamte heutige Schutztechnik in den Stromversorgungsnetzen auf dem Prinzip der zeitverzögerten Auslösung. Damit wird erreicht, daß im Fehlerfall nur der dem Fehler unmittelbar vorgelagerte Leistungsschalter abschaltet, das übrige Netz also ungestört weiterbetrieben wird („Selektivität“).

Spätestens mit der absehbaren Einführung supraleitender Komponenten in der Energieversorgung wird strombegrenzendes Schalten unerlässlich, da sonst im nie vermeidbaren Kurzschlußfall diese Komponenten nach Überschreiten des kritischen Stromes ihrer Supraleiter ihre Verlustfreiheit verlieren und thermisch zerstört würden. Hier bieten sich natürlich Strombegrenzer auf der Basis von Supraleitern an, wobei z.B. Kühleinrichtungen gemeinsam mit anderen Betriebsmitteln genutzt werden können. Aber auch Stand-Alone-Lösungen von HTSL-Strombegrenzern sind denkbar. In jedem Fall muß das gesamte Schutzprinzip der Strombegrenzung angepaßt werden.

Strombegrenzung durch Hochtemperatur-Supraleiter

Allgemein ausgedrückt besteht das Prinzip darin, daß im Kurzschlußfall der Supraleiter durch Überschreiten seines kritischen Stromes, seiner kritischen Temperatur oder seines kritischen Magnetfeldes in die Normalleitung übergeht („Quench“) und dabei den Kurzschlußstrom nach wenigen Millisekunden begrenzt. Die Auslösung kann dabei extern oder ohne Hilfsenergie durch den Kurzschlußstrom selbst erfolgen. Es sind zwei unterschiedliche Prinzipien vorgeschlagen worden, die sich nicht streng trennen lassen, das induktive und das resistive Prinzip. Bild 2 zeigt verschiedene Varianten induktiver Strombegrenzer. Der resistive Strombegrenzer, Bild 3, besteht aus dem Supraleiter R_{SC} geeigneter Länge, ggf. einem linearen oder nichtlinearen Parallelwiderstand R_P und einem konventionellen Reststromschalter zur endgültigen Abschaltung des begrenzten Stromes. Es wird angestrebt, ohne eine besondere, gestrichelt angedeutete Erkennungs- und Auslöseeinrichtung die Begrenzung allein durch den fließenden Kurzschlußstrom einzuleiten.

Bild 4 zeigt eine Zusammenstellung infragekommender HTSL-Materialien und Werkstoff-Formen für Strombegrenzer aus heutiger Sicht. Da Hochtemperatur-Supraleitermaterialien sehr bruchempfindliche Keramiken sind, und, wie später gezeigt wird,

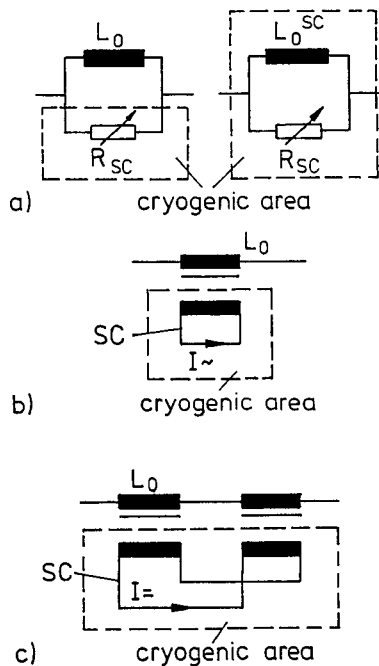


Bild 2:
Induktive Strombegrenzer

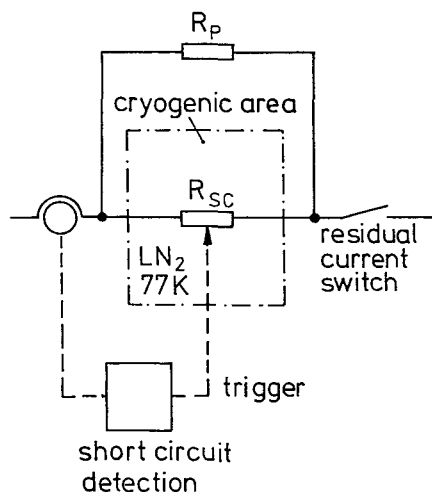


Bild 3:
Resistiver Strombegrenzer

Werkstoff

- $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO) $T_C \approx 105 \text{ K}$ (-168°C)
- $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) $T_C \approx 90 \text{ K}$ (-183°C)

Form

- Massivmaterial (Bulk)
nur induktive Begrenzer,
zu geringes J_C
- Dickschichtpasten
zu geringes J_C
- Pulver in Ag-Hülle
zu geringer Widerstand
- dünne Schichten
($<1\mu\text{m} \dots 10\mu\text{m}$) auf
Widerstandsmaterial (Band)
- dünne Schichten auf
Keramik (Al_2O_3 , ZrO_2)

Krit. Stromdichte

10^3 A/cm^2

10^3 A/cm^2

$2 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$

bis 10^6 A/cm^2

bis 10^6 A/cm^2

Bild 4:
HTSL-Materialien für Strombegrenzer

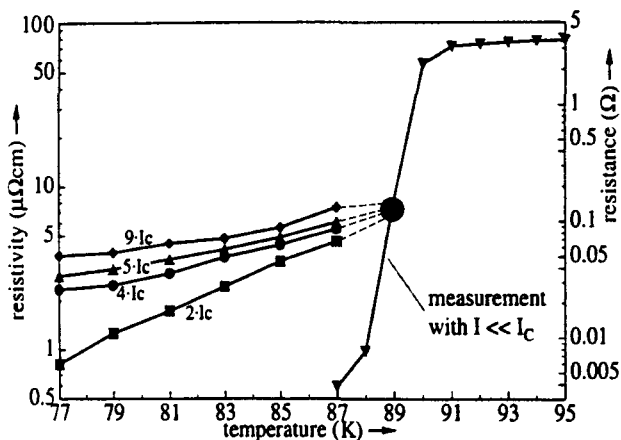


Bild 5:
Gemessene Widerstandsverläufe von YBCO abhängig von Temperatur und Strom

Massiv-HTSL mit ihren niedrigen kritischen Stromdichten ausscheiden, kommen für resistive Strombegrenzer insbesondere Kombinationen aus dünnen Supraleiterschichten hoher kritischer Stromdichten mit Trägerbändern oder -Platten aus Widerstandswerkstoffen oder Keramik in Betracht.

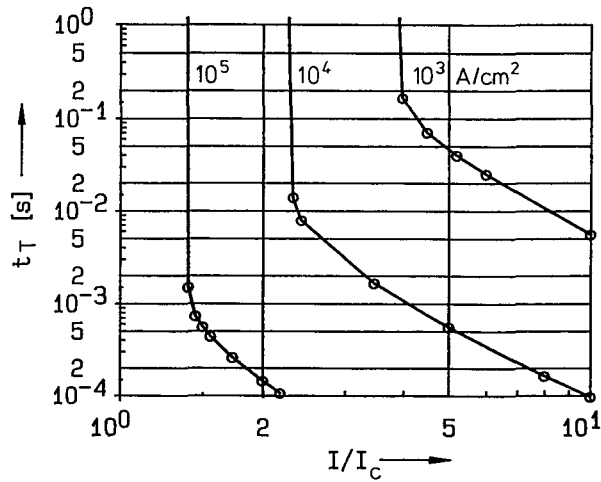


Bild 6:
Berechnete Auslösezeiten

Anhand eines typischen Strom-Temperatur-Feldes des Widerstandes einer HTSL-Probe in logarithmischer Darstellung (Bild 5) seien die prinzipiellen Abläufe erläutert: Ausgehend von 77 K Anfangstemperatur entwickelt beim Überschreiten des kritischen Stromes I_C der Leiter einen Widerstand, der zunächst nur einen geringen Bruchteil (Größenordnung 10^{-2} bis 10^{-3}) des Normalleitungswiderstandes beträgt. Die dadurch erzeugte Heizleistung erwärmt den Leiter, bis er seine Sprungtemperatur (hier ca. 88 K) erreicht und dann rasch den für die Strombegrenzung notwendigen Normalleitungswiderstand (hier ca. $0,4 \Omega$) entwickelt. Es fließt dann noch ein Reststrom, dessen Höhe durch den Normalleitungswiderstand bestimmt wird.

Durch Simulationsrechnungen des gekoppelten Stromfluß- und Erwärmungsverhaltens von Supraleiter-Substrat-Kombinationen in Wechselwirkung mit dem elektrischen Kreis, sowie aus Ergebnissen experimenteller Untersuchungen lassen sich zahlreiche Aussagen zur Dimensionierung und Materialauswahl von HTSL-Strombegrenzern gewinnen. Auf einige wichtige soll nachstehend eingegangen werden.

Bild 6 zeigt ein Beispiel berechneter Auslösezeiten, das ist die Zeit vom Kurzschlußbeginn bis zum Erreichen der Sprungtemperatur, für Massiv-HTSL mit unterschiedlichen kritischen Stromdichten. Da die Auslösezeiten für eine erfolgreiche Strombegrenzung $< 5 \text{ ms}$ liegen müssen – bei längeren Stromzeiten ist das erste Maximum bereits überschritten –, erfordern resistive Strombegrenzer Leiter mit kritischen Stromdichten oberhalb von 10^4 A/cm^2 . Experimente bestätigen diese Erkenntnis.

Bei der raschen Widerstandsänderung beim Übergang in die Normalleitung wird die in der Netz-Induktivität gespeicherte Energie im Supraleiter in Wärme umgesetzt. Außerdem können an den Induktivitäten beträchtliche Überspannungen entstehen. Bild 7 zeigt Beispiele berechneter Überspannungsfaktoren k sowie maximaler Tempe-

raturen T am Supraleiter. Geeignet dimensionierte Parallelelemente R_p nehmen einen Teil der Energie auf und reduzieren Überspannung und Temperatur.

Ein besonderes Problem stellen die unvermeidbaren Inhomogenitäten, insbesondere in der kritischen Temperatur und der kritischen Stromstärke, längs des Supraleiters dar. Bild 8 zeigt am gerechneten Beispiel eines Supraleiters, bei dem ein Bruchteil der Länge um 10% niedrigere Daten aufweist als der Rest, daß sich dieser schwächere Teil rasch erhitzt und u.U. überlastet wird, während der Rest in der widerstandslosen Supraleitung verbleibt. Bild 9 bestätigt dies anhand der gemessenen Spannungsverläufe über mehrere Abschnitte einer mäanderförmig auf Keramiksubstrat aufgetragenen HTSL-Schicht. Es wird nur ein Bruchteil des Supraleitermaterials ausgenutzt.

Zunächst in der Rechnung gezeigt, später an entsprechend gefertigten Versuchsmustern nachgewiesen, hat sich als ein probates Mittel zur Behebung des Inhomogenitätsproblems herausgestellt, zusätzlich auf die Supraleiterschicht eine dünne Metallschicht aufzubringen. Wie im Bild 10 als Ergebnis einer Simulation gezeigt, wird durch diese stabilisierende, zum Supraleiter parallel geschaltete Schicht, welche den schwächeren, zuerst quencheden Abschnitt entlastet, die Belastung erheblich vergleichmäßigt.

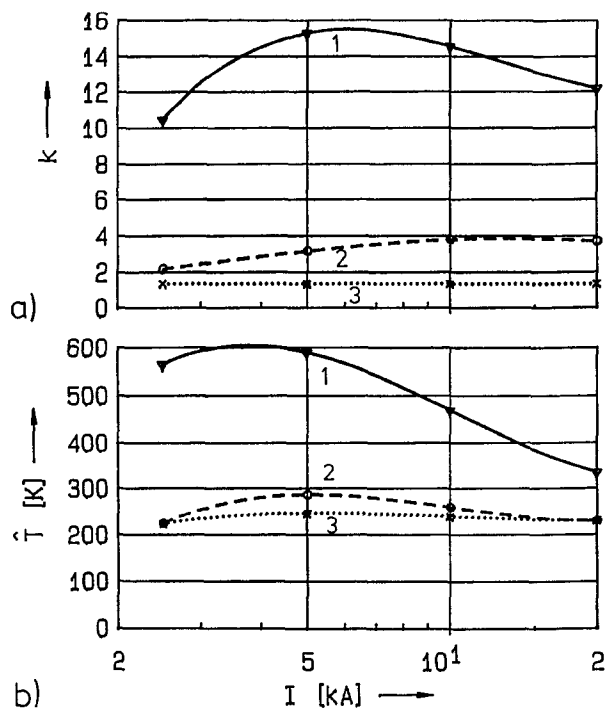


Bild 7:

Einfluß von Parallelelementen

1) ohne 2) $R = 20 \, \Omega$ 3) Spannungsbegrenzer 40 kV

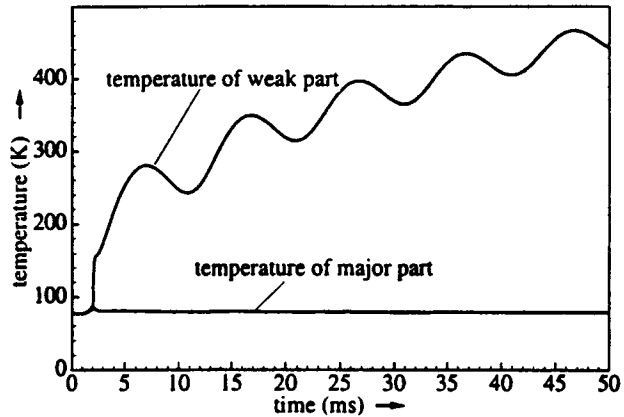


Bild 8:

Simulierter Einfluß einer Inhomogenität längs des Leiters

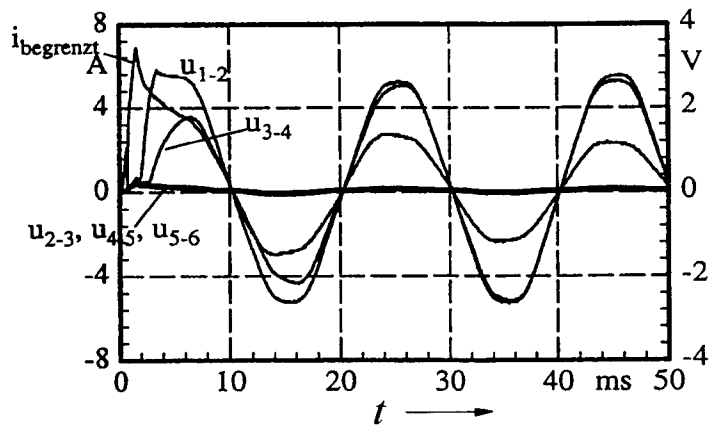


Bild 9:

Beispiel für Inhomogenitäts-Einfluß beim Schalten
Nur 2 von 5 Abschnitten (1-2 und 3-4) werden normalleitend

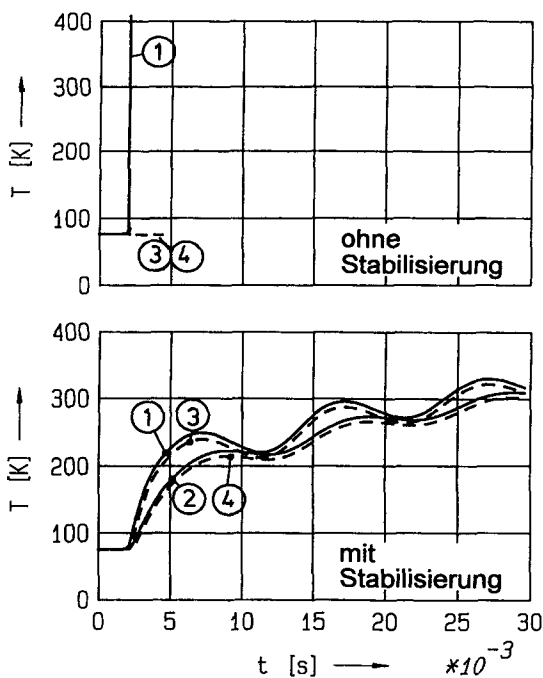
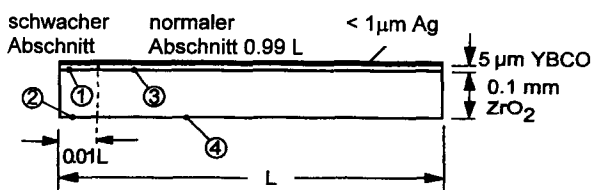


Bild 10:
Wirkung einer stabilisierenden Metallschicht:
Vergleichsmäßigung des Quenchvorgangs

Zusammenfassung, Ausblick

Durch strombegrenzendes Schalten von Kurzschlüssen in Energieversorgungsnetzen wird das Netz schwächer belastet und die Stabilität der Übertragung im Kurzschlußfall erhöht. Im Vergleich zum heutigen nicht-strombegrenzenden Schalten ergeben sich dadurch Möglichkeiten der erhöhten Ausnutzung der Netze und ihrer Betriebsmittel. Der automatische Übergang von der Supraleitung in die Normalleitung bietet sich zur Strombegrenzung an, zumal in künftigen Netzen mit supraleitenden Betriebsmitteln eine Strombegrenzung unerlässlich ist. Anhand von Simulationsrechnungen und Experimenten wurden die grundsätzlichen Abläufe bei der resistiven Strombegrenzung mit Hochtemperatur-Supraleitern dargelegt und einige Auslegungskriterien sowie Probleme diskutiert. Von besonderer Wichtigkeit ist eine hohe Homogenität der Eigenschaften des Supraleiters über seine Länge. Es wurden Möglichkeiten gezeigt, dieses Problem zu entschärfen. Die Hauptprobleme liegen derzeit noch in der Werkstofftechnologie, d.h. in der Entwicklung und Herstellung geeigneter Leiter-Substrat-Kombinationen in ausreichender Länge und guter Homogenität.

Manfred Lindmayer
Am Papenholz 15
38104 Braunschweig